

文章编号: 1000-7598-(2007)02-0297-05

大直径超长桩压浆后承载性能的 试验研究及有限元分析

黄生根¹, 龚维明²

(1. 中国地质大学(武汉) 工程学院, 武汉 430074; 2. 东南大学 土木工程学院, 南京 210096)

摘要: 结合大直径超长桩试桩得到的试验资料, 应用有限元方法分析了压浆对大直径超长钻孔灌注桩承载性能的影响。根据反分析计算结果可知, 桩周摩阻力、桩端加固体变形模量及桩周土的变形模量均有不同程度的提高, 桩周土在整个桩长范围内变形模量提高幅度为33%~67%, 平均侧阻力提高幅度为30%~40%, 与实测结果相基本一致。

关键词: 大直径超长桩; 后压浆; 承载特性; 摩阻力; 有限元

中图分类号: TU473.1

文献标识码: A

Test study and finite element analysis of bearing behavior of large diameter overlength piles after grouting

HUANG Sheng-gen¹, GONG Wei-ming²

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China;

2. College of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Effects of grouting on the bearing behavior of bored pile are analyzed with the finite element method in accordance with the test results of large diameter over length piles. According to the back-analysis results, shaft friction, modulus of deformation of consolidation body in the base and modulus of soils are improved in different degrees, modulus of deformation of soils along shafts were improved 33%-67%; the average friction resistances are improved 30%-40%; which are satisfactory relatively.

Key words: large diameter overlength pile; post-grouting; bearing behavior; frictional resistance; finite elements

1 前言

后压浆技术以往主要应用于桩径、桩长相对较小的桩, 对其作用机理的研究主要停留在有限的试验数据的统计分析上, 且一般以为桩端压浆主要提高桩端阻力, 桩侧压浆主要提高侧阻力。但根据近年来的工程实测资料^[1-3], 特别是新郑黄河二桥、杭州湾跨海大桥、苏通大桥、东海大桥等超长桩的实测资料说明, 桩端压浆不仅可提高桩端阻力, 还可大幅提高桩侧阻力。本文根据苏通大桥二期试桩得到的试验资料, 结合有限元计算分析了后压浆技术对大直径超长钻孔灌注桩承载性能的影响。

2 大直径超长桩的现场试验

2.1 工程概况

苏通大桥主桥采用1088 m的双塔斜拉桥, 专用通航孔采用140+268+140 m连续钢构。基础采用钻孔灌注桩, 其中主桥和近塔辅助墩基础采用 $\phi 2.5$ m群桩基础。二期试桩的主要目的在于检验主桥基础钻孔灌注桩的承载力及其施工工艺。场区地质条件概况如下: ②层为亚黏土, 冲积成因, 灰黄色, 可塑。③层为淤泥质亚黏土, 浅海-冲积成因, 灰色, 流塑, 夹薄层粉砂。④层为亚黏土, 浅海-冲积成因, 灰色。上部④-1层为亚黏土, 软塑, 下部④-2

层为亚黏土夹粉砂或与粉砂互层，灰色。⑤层为长江冲积成因。⑤-2-1 层为亚黏土，局部为亚黏土与粉砂互层，灰色，中密或软塑状，⑤-2 层为粉细砂，灰色，饱和，密实。⑥层为以中粗砂为主，灰色，饱和，密实。⑦层为粉细砂，灰色，饱和，密实。⑧-1 层为中砂，灰色，饱和，密实，含少量中细砂及砾砂。⑧-2 层为细砂，灰色，饱和，密实。持力层为中砂层。

二期试桩对 SZ2 和 SZ3 桩进行了压浆后的自平衡载荷试验，SZ4 桩进行了压浆前后的自平衡载荷试验。试桩参数见表 1。后压浆采用桩端压浆工艺，施工参数见表 2^[4-6]。

表 1 试桩参数
Table 1 Parameters of test piles

编号	直径/m	桩长/m	测试方法
SZ2	2.5	125	先压浆，后测试
SZ3	2.5	106	先压浆，后测试
SZ4	2.5	125	先测试，后压浆，再测试

表 2 压浆施工参数
Table 2 Grouting construction parameters

参数	试桩编号		
	SZ2	SZ3	SZ4
压浆量 /t	8.6	11	9
压力 /MPa	7~8	6.5	5~7

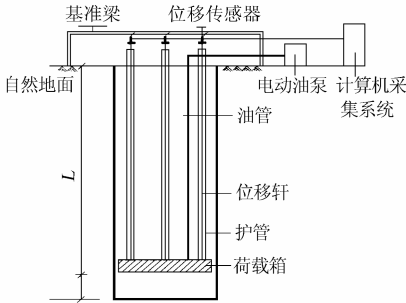
2.2 自平衡静载荷试验

2.2.1 试验方法及原理

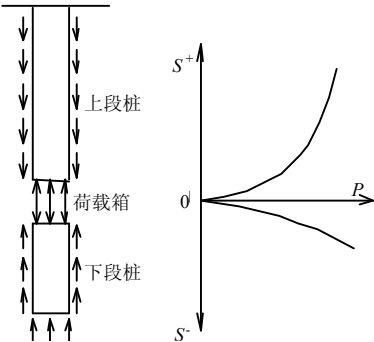
自平衡测试法利用预埋在桩身的荷载箱进行静载荷试验。试验时，通过地面高压油管对荷载箱内腔施加压力，箱顶与箱底被推开，产生向上与向下的位移，从而调动桩周土的侧阻力与端阻力，直至破坏，其测试原理见图 1。将桩侧土摩阻力与桩端土阻力以一定方式迭加而得到单桩抗压极限承载力^[7]。加载采用慢速维持荷载法，按交通部标准《公路桥涵施工技术规范》^[8]及江苏省地方标准《桩承载力自平衡测试技术规程》^[9]进行。各试桩的桩身按土层界面布置钢筋应力计，每个截面对称布置 3~4 个钢筋应力计。

2.2.2 试验结果

由试验资料经转换方法得到的桩顶荷载-沉降关系曲线见图 2 所示。桩的极限承载力及压浆前后的承载力对比见表 3。压浆后桩，端阻力提高 2.93 倍，桩侧阻力提高 33.98%，极限承载力提高 69%，侧阻力增量占极限承载力增量比例为 88%。



(a) 测试系统示意图



(b) 测试曲线示意图

图 1 自平衡测试法测试原理

Fig.1 The principle of the self-balanced load test method

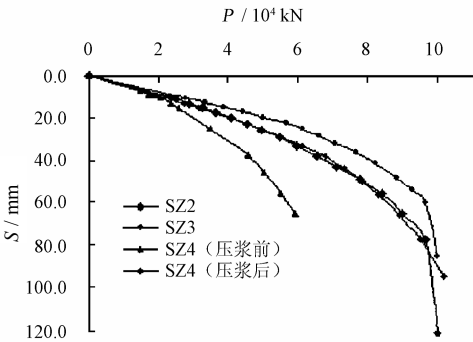


图 2 桩顶荷载-沉降关系曲线

Fig.2 The load-settlement relationship curves

表 3 桩的极限承载力及构成
Table 3 Ultimate bearing capacities of piles and their constitutions

桩号	状态	极限承载力 / kN	桩端阻力 / kN	桩端阻力所占比例 / %	总侧摩阻 / kN	总侧阻力所占比例 / %
SZ2		96 481	14 656	15.19	81 825	84.81
SZ3		96 746	30 761	31.8	65 985	58.43
SZ4	压浆前	59 638	8 485	14.23	51 153	85.77
	压浆后	100 538	33 375	33.2	68 533	66.8

3 后压浆对桩承载性能影响的有限元分析

3.1 土的本构模型

土的本构模型采用 Mohr-Coulomb 模型。在子午面内，流动势函数采用双曲线函数表示，见图 3，在 π 平面内采用 Menétrey 和 Willam (1995 年)提出的圆滑椭圆函数表示，见图 4。

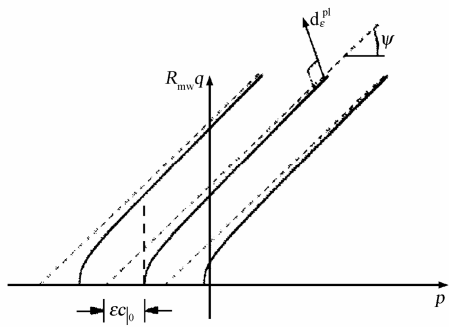


图 3 子午面内双曲线流动势函数图
Fig.3 The hyperbolic potential flow function in the meridian plane

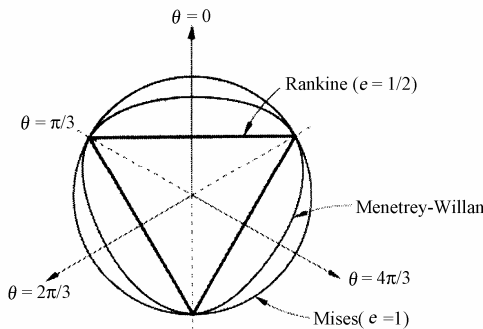


图 4 π 平面内 Menétrey 和 Willam 流动势函数
Fig.4 Menétrey and Willam flow potential function in the π plane

3.2 计算模型

3.2.1 模型参数

计算时桩体混凝土采用线弹性模型，考虑桩土之间的相对滑动及土体和桩体的重力。竖向边界取 $2.5L$ ，侧向边界取 $10D$ 。桩端压浆固结体采用直径为 D_b 、高度为 D 的圆柱体计算，示意图见图 5。模型土表面为自由边界，土侧和土的底部取为固定支座。为减少单元网格，考虑到模型的轴对称性，取 $1/4$ 进行计算，计算结果不受影响。对称面上的边界条件为：约束垂直于对称面方向的位移。部分计算模型的网格划分见图 6。

网格中，对三角形单元采用 6 节点等参数单元，对四边形单元采用 8 节点等参数单元。

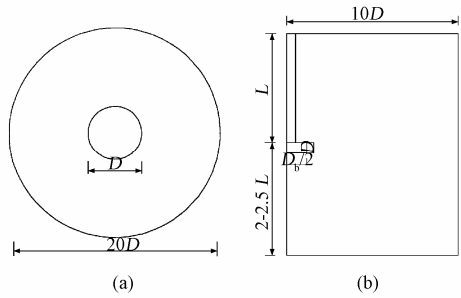


图 5 计算模型示意图
Fig.5 The diagrammatic sketch of calculation model

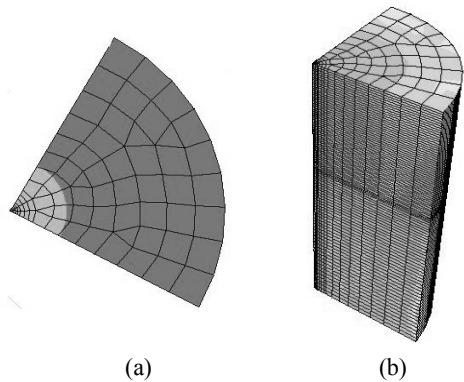


图 6 部分计算模型的网格划分
Fig.6 The mesh of some calculation models

3.2.2 材料参数

为便于计算，假定土体和桩体为均质、桩顶为均布荷载。混凝土的泊松比 $\nu = 0.2$ ，弹性模量 $E = 2.8 \text{ GPa}$ ，桩径 $D = 2.5 \text{ m}$ 。土体参数见表 4，为试桩地层参数的加权平均值。

表 4 土体参数
Table 4 The parameters of soils

c / kPa	$\phi / (^{\circ})$	E / MPa	K_0	ν
20	30	60	0.6	0.35

3.2.3 计算模型的检验

为检验计算模型及参数的选择是否合理，首先不考虑桩端注浆的影响，应用 ABAQUS 有限元软件取两种情况进行计算并与试验资料进行对比，计算结果见图 7 和图 8，图 7 对比桩为试桩 SZ4 压浆前的测试结果，图 8 对比曲线为南京水科院离心模型试验结果，模拟对象为苏通大桥主塔下桩长 125 m 及桩径为 2.5 m 的单桩。

由上述对比曲线可知，当 $S = 40 \text{ mm}$ 时，有限元结果比静载试验结果小 4% ，比离心试验结果小 12.5% ；当 $S = 60 \text{ mm}$ 时，有限元结果比静载试验结果大 5% ，与离心试验结果相同。有限元计算结果与试验结果，有一定的误差，但从总体看，有限

元计算结果还是比较理想的, 说明计算模型和参数的选择基本是合理的。

3.3 苏通二期试桩有关参数的反分析

根据检测结果, 桩端加固体范围基本在径向 5 m、轴向 2.5 m 范围内, 取 $D_b = 5$ m, 高度为 2.5 m 的圆柱体模拟 SZ4 压浆后的桩端加固体, 若不考虑桩端压浆对桩周土和桩土界面的影响, 压浆后计算结果与实测结果相比偏小, 如图 9 所示 (不同曲线对应不同强度)。

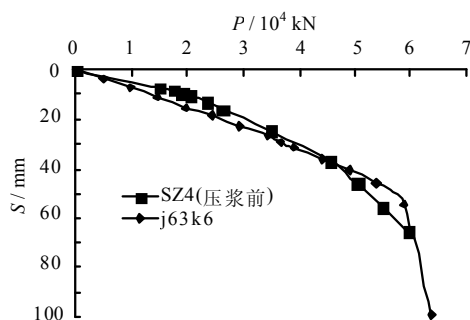


图 7 有限元结果与静载试验结果对比
Fig.7 The contrast of FEM results and static load test results

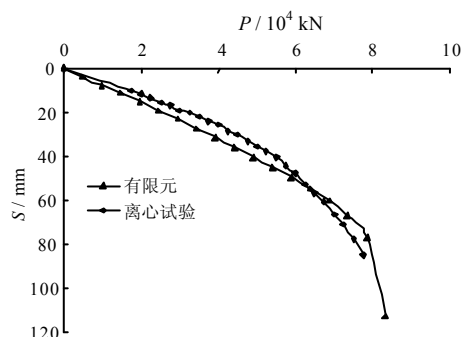


图 8 有限元结果与离心试验结果对比
Fig.8 The contrast of FEM results and centrifugal test results

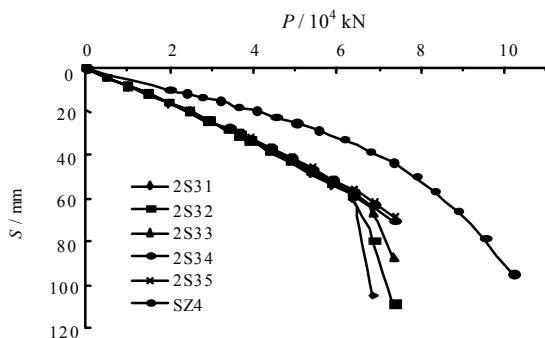


图 9 计算结果与实测结果的对比
Fig.9 The contrast of calculation results and test results

由于压浆会引起桩端土、桩侧土及桩土接触面的变化, 为考虑有关参数变化对承载力的影响, 取摩阻力分别提高 20%, 30%, 40% 和 50%, 桩端加固体变形模量分别为 100, 200, 400, 600 MPa, 桩周土的变形模量分别取 60, 80, 100 MPa 进行计算。

为比较最接近实测曲线的计算参数, 取目标函数为

$$F = \sum (S_c(i) - S_T(i))^2 \quad (1)$$

式中: $S_c(i)$ 为某一种参数组合的 i 点沉降计算值; $S_T(i)$ 为 i 点实测沉降值。

对上述计算参数进行组合, 寻找使目标函数最小, 即 $F = \min$ 的参数。在所有计算方案中, $\min = 351.18$, 计算结果见图 10, 计算值与实测值的对比见图 11。对应的计算参数为侧压系数提高 30%, 桩端加固体的变形模量 $E = 600$ MPa, 桩周土的变形模量为 80 MPa。摩阻力提高值与实测桩侧摩阻力的平均提高值 33.98% 基本接近。SZ2 的反分析计算结果见图 12, 摩阻力提高 30%, 桩端加固体的变形模量 $E = 200$ MPa, 桩周土的变形模量 80 MPa。SZ3 的反分析计算结果见图 13, 摩阻力提高 40%, 桩端加固体的变形模量 $E = 600$ MPa, 桩周土的变形模量的 100 MPa。与压浆前土层参数相比, 桩周土在整个桩长范围内变形模量提高幅度为 33%~67%。一期试桩在压浆前后进行了桩周土标贯试验, 做标贯试验的 12 m 范围内, 标贯值最大提高幅度为 67%, 最小提高幅度为 18%, 说明桩端压浆不仅可提高桩端阻力, 还对桩周土的强度和模量会产生明显的影响。

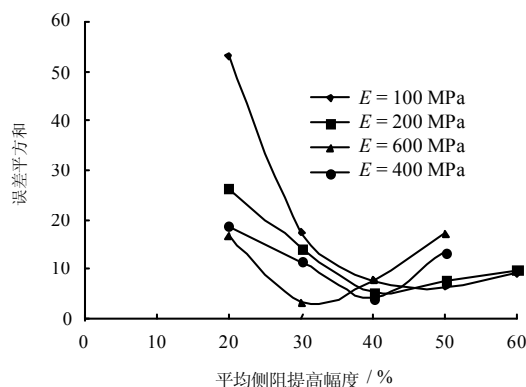


图 10 计算参数与目标函数值关系
Fig.10 The relationship of calculation parameters and objective function values

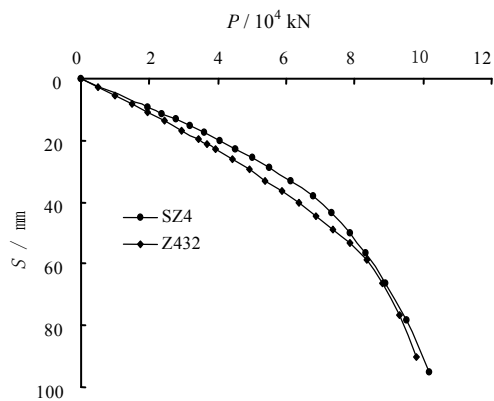


图 11 SZ4 有限元计算值与实测值的对比

Fig.11 The contrast of FEM results and test results of SZ4

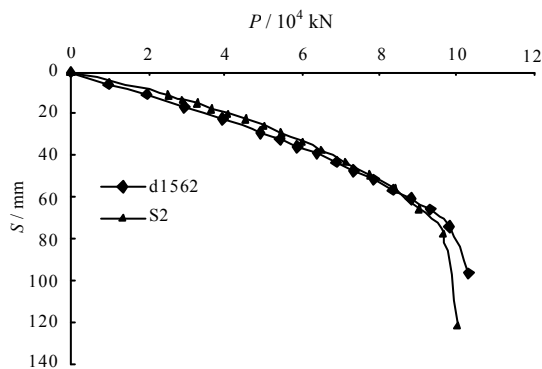


图 12 SZ2 有限元计算值与实测值的对比

Fig.12 The contrast of FEM results and test results of SZ2

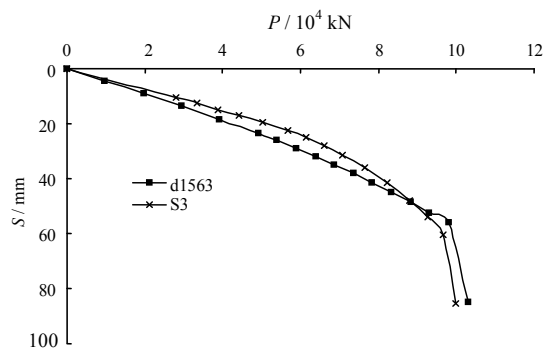


图 13 SZ3 有限元计算值与实测值的对比

Fig.13 The contrast of calculation results and test results of SZ3

4 结 论

(1) 根据苏通大桥二期试桩 SZ4 压浆前后自平衡荷载试验结果, 压浆后桩端阻力提高 2.93 倍, 桩侧阻力提高 33.98 %, 极限承载力提高 69 %, 侧阻力增量占极限承载力增量比例为 88 %。对大直径超长桩进行桩端压浆, 不仅可提高桩端阻力, 还可大幅提高桩侧阻力。

(2) 根据反分析计算结果, 桩周摩阻力、桩端加固体变形模量及桩周土的变形模量均有不同程度的提高, 桩周土在整个桩长范围内变形模量提高幅度 33 %~67 %, 平均侧阻力提高 30 %~40 %, 与实测结果基本相一致。

参 考 文 献

- [1] 黄生根, 龚维明. 苏通大桥一期超长试桩承载特性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3 370—3 375.
HUANG Sheng-gen, GONG Wei-ming. Analysis of bearing behavior of 1-stage super long-large diameter testing piles in Su-Tong Bridge[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(19): 3 370—3 375.
- [2] 黄生根, 张晓伟, 曹辉. 后压浆钻孔灌注桩的荷载传递机理研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(2): 251—254.
HUANG Sheng-gen, ZHANG Xiao-wei, CAO Hui. Mechanism study on bored cast-in-place piles with post-grouting technology[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(2): 251—254.
- [3] 黄生根, 王辉, 张晓伟. 超长直径桥桩的压浆效果研究[J]. 公路交通科技, 2004, 21(5): 70—73.
HUANG Sheng-gen, WANG Hui, ZHANG Xiao-wei. Study on the grouting effects of super long large diameter bridge piles[J]. **Journal of Highway and Transportation Research and Development**, 2004, 21(5): 70—73.
- [4] Bruce D A. Enhancing the performance of large diameter piles by grouting[J]. **Grouting Engineering**, 1985, (4): 9—15.
- [5] Bruce D A. Enhancing the performance of large diameter piles by grouting[J]. **Grouting Engineering**, 1985, (5): 11—19.
- [6] Fleming W G K. The improvement of pile performance by base grouting[J]. **Proceeding Institution of Civil Engineers**, 1993, (8): 88—93.
- [7] 龚维明, 戴国亮, 蒋永生, 等. 桩自平衡测试理论与实践[J]. 建筑结构学报, 2002, 23(1): 82—88.
GONG Wei-ming, DAI Guo-liang, JIANG Yong-sheng. The theory and practice of self-balanced test[J]. **The Journal of Architecture Structure**, 2002, 23(1): 82—88.
- [8] JTJ024—85, 公路桥涵地基基础设计规范[S].
- [9] DB32/T291—1999, 桩承载力自平衡测试技术规程[S].